Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 36, 2. 2025. (1-16)



Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir



Iron&Steel Society of Iran

Studying the Effect of Grinding Mechanism and Composition of Golgohar Concentrate on the Microstructure and Mechanical Properties of Containing Pellets

Research Article

Abouzar Eskandarinasab[1], Kazem Tahmasebi[2], Gholam Hossein Akbari[3]

DOI: 10.22067/jmme.2025.90387.1162

1- Introduction

Pelletizing is an intermediate process of producing direct reduction or blast furnace raw materials during the steel production cycle. Iron ore fines, adhesive, and water, are converted into agglomerates of a certain size by rolling, during pelletizing process. Factors affecting the quality of pellets include particle size distribution, specific surface area, particle shape, wettability of particles, adhesive content, and dough moisture content. The crystalline composition of particles is also effective in pellet production if it includes clay components of adhesive materials. The purpose of this study is to compare the input feed grinding mechanism and its effect on the strength of the produced pellets. By examining the quality of the raw pellet produced in the two grinding methods of ball mill and HPGR and examining the microstructural changes caused by these two types of grinding on the cooked pellet, the effect of each of these factors on the final strength and properties of the cooked pellet has been evaluated.

2- Materials and Methods

To investigate the effect of the grinding process type on the properties of pellets produced in two different factories of No. 1 and 2, which use ball mill and HPGR, respectively, tests were conducted at different stages of the production line to measure the mechanical, physical, chemical, surface adsorption, and microstructural properties of the materials.

3- Results and Discussion

The results of the chemical analysis of the feed entering plants 1 and 2 indicate the presence of a higher percentage of FeO, sulfur, and magnesium oxide in the feed entering the pelletizing plant 1. Ball milling process results in a finer grain size and consequently a much higher percentage of grain sizes below 45 microns compared to HPGR milling, which can lead to increased water absorption and higher pellet recovery rates. This can also be seen in the higher distribution of finer particles in the feed of plant 1 shown in Figure 1.



Figure 1: Particle size distribution of feed entering the mixer based on the particle flow rates

Figure 2 (a, b) shows the results of SEM analysis of raw pellet samples. The distribution of different phases of magnetite (Mag), calcium oxide (Cal) and bentonite clay (Cly), pyrite (Py) and quartz (Qtz) is seen in the raw pellets. The distribution of smaller magnetite particles in plant 1 (Figure 2a) which was ground by ball milling is evident, which is in accordance with the statistical results of particle sieving in Figure 1. Also, the morphology of the particles produced in both plants has sharp edges and the particles are not spherical. According to specific surface area results, the particles produced in plant 1 using the ball mill have a much higher specific surface area (1988 g/cm^3). Although the difference in specific surface area in the BET results is only 3%, if we compare the results with

*Manuscript received October 21, 2024, Revised January 13, 2025, Accepted, May 10, 2025.

[1] M.Sc. Department of Materials Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[2] Corresponding author: Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. **Email**: tahmasebi@uk.ac.ir

[3] Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

the particle size distribution analysis in Figure 1, it is observed that the finer particle size distribution in the ball mill grinding method led to the formation of finer particles, which is more in accordance with the Blaine analysis.

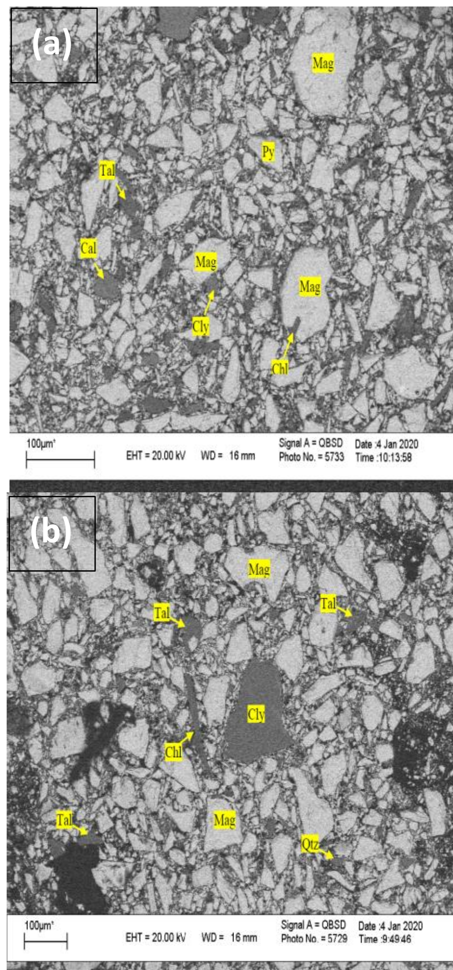


Figure 2: SEM image of the cross-section of raw pellets from a) Plant No. 1 and b) Plant No. 2

The average moisture content of the pellets in plant 1 is 7.3% and in plant 2 is 7.8%. The drop number of the raw pellets in the pelletizer 1 is 3.7±1.4 and in the pelletizer 2, the drop number is higher and is 5±1.9. The higher moisture content in plant 2 means more water removal during drying, a higher void fraction, and a lower density after drying, which can lead to a decrease in raw strength. The average compressive strength of raw pellets in the wet state in plant 1 is 0.98 ± 0.41 kg/pellet and in plant 2 is 0.76 ± 0.38 kg/pellet, and the dry strength of raw pellets in plant 1 is 3.5 ± 1.09 kg/pellet and in plant 2 is 3.7 ± 1.96 kg/pellet. Based on the strength measurement results, the pellets produced in Plant 1 have higher wet strength (WCS), while the dry strength (DCS) and fired strength (CCS) of the pellets produced in Plant 2 are higher. The higher wet strength can be attributed to the finer grain size, higher specific surface area, and higher plasticity of the feed particles entering Plant 1, because according to SEM results, the particles have similar morphology and the shape of the particles did not have a significant effect on their strength or compressibility. The higher dry strength in Plant 2 can also be attributed to a better distribution of the cohesive clays with higher moisture content. The higher average fired strength of the samples produced in Plant 2 can also be attributed to the lower sulfur fraction in the chemical composition of the feed entering Plant 2. Based on the results of the abrasion and sphericity tests shown in Table 4, the pellets produced in Plant 1 had higher abrasion resistance and the percentage of intact pellets remaining after abrasion was higher in this plant, which is consistent with microscopic observations of finer particles and more uniform porosity distribution in the pellets from Plant 1. In addition, the products from Plant 1 also had better sphericity, indicating less deformation of the pellets due to a more uniform distribution of the molten glass phases formed.

4- Conclusions

The particles produced by the ball mill method are finer and have a higher specific surface area (1988 g/cm^3). In addition, a more uniform distribution of fine particles is seen in the products of this type of grinding, which is also evident in the results of electron microscope analysis of the pellets before the firing process. It can be argued that this better distribution leads to a better distribution of the molten phases in the firing process, and as a result, the formed molten glass phase is uniform and the amount of particle deformation has decreased, so that the abrasion resistance and sphericity of the pellets produced by the ball mill method are higher with the average of 0.824.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۶، ۲، ۱۴۰۴. (۱۶-۱)



مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

بررسی تأثیر مکانیزم خردایش و ترکیب کنسانتره گل گهر روی ریزساختار و خواص مکانیکی گندله

مقاله پژوهشی

ابوذر اسکندری نسب[۱] کاظم طهماسبی[۲]  غلامحسین اکبری[۳]

DOI: 10.22067/jmme.2025.90387.1162

چکیده در این تحقیق تأثیر ترکیب مواد اولیه و فرایند خردایش در مجتمع گل گهر روی خواص گندله نهایی بررسی شده است. آنالیز ترکیب مواد اولیه، دانه‌بندی، میزان رطوبت و اندازه‌گیری سطح ویژه به دو روش بلین و BET انجام شد. همچنین اندازه‌گیری استحکام و آنالیزهای ریزساختاری به کمک SEM از گندله‌های خام و پخته شده انجام شد و مقاومت سایشی و میزان کرویت گندله‌ها بررسی گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دانه‌بندی ذرات تولید شده توسط آسیای گلوله‌ای ریزتر است و سطح ویژه بلین بالاتر (۱۹۸۸ cm^2/g) دارند، اما بر اساس آزمون BET سطح ویژه ذرات تولید شده با هر دو روش خردایش به هم نزدیک است. مورفولوژی ذرات تولید شده توسط دو روش آسیاکاری به شکل نامنظم و غیر کروی بوده است. خوراک ورودی کارخانه گندله‌سازی شماره یک، دارای درصد بالاتری از FeO، گوگرد و اکسید منیزیم است. همچنین بررسی‌های ریزساختاری گندله نشان از توزیع بهتری از ذرات ریزدانه و فازهای غیر مگنتیتی در گندله‌های تولید شده در کارخانه شماره یک دارد. گندله تولید شده در کارخانه شماره ۱ استحکام بالاتر در حالت گندله مرطوب (WCS) دارد، در حالی که استحکام خشک (DCS) و استحکام پخت (CCS) گندله در کارخانه شماره ۲ بالاتر است. علاوه بر این ۹۶/۳ درصد گندله‌های کارخانه شماره یک تست سایش دامپلر را بدون خرد شدن گذرانده‌اند و میزان کرویت آن‌ها ۰/۸۲۴ بوده که نسبت به گندله‌های تولید شده به روش سایش HPGR بالاتر است.

واژه‌های کلیدی گندله، احیای آهن، HPGR، مگنتیت، دانه‌بندی.

Studying the Effect of Grinding Mechanism and Composition of Golgohar Concentrate on the Microstructure and Mechanical Properties of Pellets

Abouzar Eskandary Nasab Kazem Tahmasebi Gholam Hossein Akbari

Abstract *The effect of the raw material composition and the grinding process (using ball mill and HPGR) in the Golgohar Complex on the properties of the final pellet was investigated. Tests were performed on the mixer input feed, including raw material composition analysis, granulation, moisture content, and specific surface area measurement (**using** two methods: Blaine and BET). Additionally**,** strength measurement and microstructural analysis (**conducted** using SEM) were performed on both raw and fired pellets. Furthermore, the abrasion resistance and sphericity of the pellets were evaluated.The test results showed that the particle size produced by the ball mill was finer and had a higher specific surface area (1988 cm^2/g). The morphology of the particles produced by the two milling methods was irregular and non-spherical, with no significant difference between them. The input feed of Pelletizing Plant No. 1 had a higher percentage of FeO, sulfur, and magnesium oxide.Microstructural studies of the pellets indicated a better distribution of fine particles and non-magnetic phases in those produced in Plant No. 1. Additionally, the pellets from Plant No. 1 exhibited higher wet compressive strength (WCS), while those from Plant No. 2 had higher dry compressive strength (DCS) and fired compressive strength (CCS). Moreover, 96.3% of the pellets from Plant No. 1 passed the Drum Abrasion Test without crushing, and their sphericity (0.824) was higher than that of the pellets produced by the HPGR method.*

Key words Pellets, Iron recovery, HPGR, Magnetite, Granulation

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۷/۳۰و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۲۱ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

(۳) استاد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

Email: tahmasebi@uk.ac.ir

مقدمه

گندله‌سازی فرایندی واسطه برای تولید مواد اولیه احیای مستقیم یا کوره بلند در چرخه تولید فولاد است. نرمه‌های سنگ آهن به همراه چسب و آب در اثر غلتاندن، به آگلومره‌هایی با اندازه مشخص تبدیل می‌شوند که گندله نام دارد. خاصیت اصلی و لازم ذرات مواد برای گندله‌سازی، قابلیت آن‌ها برای تولید گندله‌هایی با استحکام فشاری مناسب است که از تمایل آن‌ها به کروی شدن ناشی می‌شود. قابلیت کروی شدن ذرات هم نتیجه خواصی چون کاهش انرژی سطحی ذرات در اثر تمایل به کاهش انرژی است [1]. برای تولید گندله خام، نرمه سنگ آهن شامل مواد افزودنی که اندازه درصد بالایی از آن کوچک‌تر از ۴۴ میکرومتر است با محلول‌های ترکننده مانند آب، جهت دستیابی به شکل کروی در دستگاه‌های گندله‌ساز به چرخش درآورده می‌شود تا گندله خام تولید گردد [2]. در حین تولید گندله خام ممکن است مواد افزودنی و چسبنده برای بهبود کیفیت و خواص متالورژیکی ـ مکانیکی گندله به آن اضافه شود. در مرحله بعد گندله خام تحت حرارت قرار می‌گیرد تا ابتدا خشک و سپس پخته شود به طوری که بدون کاهش میزان تخلخل آن و برقراری پیوند بین ذرات سنگ آهن و مواد سرباره‌ساز، استحکامش افزایش یابد. با سرد شدن گندله، به طوری که در آن ترک ایجاد نشود، گندله آماده احیاست [3].

طی فرایند تولید گندله‌های سنگ آهن اکسیداسیون مگنتیت بین ذرات کنسانتره، پیوندی قوی ایجاد می‌کند و موجب استحکام گندله می‌شود که در نتیجه تولید غبار کم‌تر در کوره احیای مستقیم را به همراه دارد [4]. همچنین، فرایند گندله‌سازی منجر به ایجاد سطح متخلخل درون گندله‌ها برای نفوذ گازهای اکسیدی در کوره گندله‌سازی و گازهای احیایی در کوره احیای مستقیم می‌شود. تهیه خوراک مناسب برای کوره‌های احیا با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی یکسان، کاهش سرباره‌سازی و بالا بردن راندمان تولید در فرایند فولادسازی با حذف عناصر مذاب در طی گندله‌سازی و حمل و نقل و جابه‌جایی راحت‌تر گندله در مخازن و کوره احیای مستقیم از دیگر مزایای گندله‌سازی است [5].

از عوامل تأثیرگذار بر گندله‌شوندگی می‌توان به توزیع دانه‌بندی ذرات، سطح ویژه، شکل ذرات، قابلیت تر شدن ذرات، میزان چسب و درصد رطوبت خمیر اشاره کرد. ترکیب بلوری ذرات نیز اگر شامل اجزای رسی مواد چسبنده باشد، در تولید گندله مؤثر است [6]. خواص شیمیایی خوراک ورودی، شامل ترکیب عیار آهن به همراه ناخالصی‌ها است که نمی‌توانند از حد معینی بیشتر یا کمتر شوند، مثلا گوگرد باید کمتر از ٪ ۰/۳ باشد تا کیفیت گندله تولیدی بالا رود. همچنین میزان عیار آهن در خوراک ورودی اگر خیلی زیاد و مواد سرباره‌ساز بسیار کم باشند، تشکیل سرباره و یا برقراری پیوند بین اجزای مواد اولیه برای ایجاد استحکام گندله پخته و استحکام حین احیای گندله برقرار نمی‌شود و در این صورت باید از چسب زیاد استفاده کرد [1,3]. هر چه سطح ویژه پودر بیشتر شود، سطح تر شوندگی ذرات بیشتر می‌شود. اگر گندله خام استحکام کافی را نداشته باشد یا رطوبت زیادی داشته باشد، در حین نقل و انتقال ترک و شکاف‌هایی بر روی آن به وجود خواهد آمد و ترک در گندله خام باعث کاهش استحکام گندله پخته می‌شود [7].

در کوره گندله‌سازی، سرعت نفوذ هوای داغ و اکسایش، به غلظت اکسیژن در گاز خشک کننده بستگی دارد. هر چه محیط اکسیدی‌تر باشد، مگنتیت باقی مانده کمتر خواهد بود. افزایش دمای گاز خشک کننده نیز با افزایش سرعت عبور گاز از حفره‌ها، اکسایش را بهبود می‌دهد. زمان نیز در نفوذ اکسیژن و اکسایش مگنتیت عامل مهمی است؛ با طولانی‌تر شدن زمان پخت، نفوذ اکسیژن عمیق‌تر و اکسایش مگنتیت کامل‌تر خواهد شد. در نهایت سرعت اکسیداسیون به سطح ویژه ذرات گندله نیز بستگی دارد. هر چه ابعاد دانه‌های مگنتیتی ریزتر باشد، به علت داشتن سطح واکنش بیشتر، سرعت اکسایش بیشتر خواهد بود؛ بنابراین معمولا برای تولید گندله از کانه مگنتیتی، مواد اولیه تحت خردایش بیشتری قرار می‌گیرند [3].

در مجتمع گل گهر خردایش خوراک ورودی به کارخانه گندله‌سازی شماره ۱ با آسیای گلوله‌ای و خردایش خوراک ورودی به کارخانه گندله‌سازی شماره ۲ به وسیله آسیای غلتکی فشار بالا صورت می‌گیرد. مکانیزم کاهش اندازه ذرات در آسیای گلوله‌ای، سایش است که در اثر سایش ذرات روی یکدیگر و یا سایش ذرات روی گلوله‌ها به وجود می‌آید. به طور کلی این مکانیزم در آسیاهای گلوله‌ای در حرکت آبشاری اتفاق می‌افتد که موجب تولید ذرات با ابعاد بسیار ریز می‌گردد [8]. مناسب‌ترین اندازه ذرات برای ساخت گندله ناشی از

خردایش توسط آسیای گلوله‌ای، برابر با ۸۰ ٪ کوچک‌تر از ۴۵ میکرون (K80=۴۵μm) با سطح ویژه ذرات برابر با ۱۸۰۰ $\frac{cm^2}{g}$ است [6]. شکل ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای نزدیک به دایره و با برجستگی‌های کم روی ذرات در بلین‌های بالا است؛ زیرا در آسیای گلوله‌ای در اثر تماس ذرات با یکدیگر یا در اثر ضربه گلوله‌ها، گوشه‌های تیز ذرات از بین می‌رود و برجستگی‌های آن‌ها کم می‌شود. افزایش سطح ویژه پودر در آسیای گلوله‌ای فقط منوط به کاهش اندازه ذرات در اثر ضربه گلوله‌ها و سایش است. سطح ویژه پودر را با دو روش شار هوایی یا تراوایی گاز (بلین) یا روش نفوذ گاز خنثی بر روی سطوح، BET، مشخص می‌نمایند. این دو روش اندازه‌گیری اعداد متفاوتی را از سطح ویژه ارائه می دهند، به طور مثال در بررسی صورت گرفته در خط ۵ مجتمع گل گهر که بلین آسیای گلوله‌ای $\frac{cm^2}{g}$ ۱۸۰۰ می‌باشد، سطح ویژه اندازه‌گیری شده با روش BET برابر با $\frac{cm^2}{g}$۸۵۰۰ می‌باشد [9].

تغییر ترکیب شیمیایی خوراک ورودی مجتمع‌های فراوری سنگ آهن کار بسیار دشوار و پرهزینه‌ای هست چرا که تولید آهن در مقیاس بسیار وسیع صورت می‌گیرد و آهن جزو فلزات نادر با ارزش افزوده بالا نیست و ارزش افزوده فولاد عمدتا ناشی از تولید انبوه آن است. به همین واسطه بسیاری از محققان در تلاش برای بهبود کیفیت گندله و نرخ احیاپذیری آن از طریق تغییر پارامترهای فیزیکی هستند؛ به طور مثال پال و همکارانش [10]، بدون تغییر ترکیب شیمیایی و صرفا با تغییر اندازه ذرات افزودنی‌هایی مثل آهک و ذغال سنگ آنتراسیتی و حفظ دمای پخت در محدوده ۱۲۵۰ °C تا ۱۲۷۵ C° موفق به افزایش ۷ درصدی نرخ احیای گندله‌ها شدند. ایلجانا و همکارانش [11]، تأثیر اندازه گندله‌ها روی خواص متالوژیکی آن را بررسی کرده‌اند، نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش اندازه ذرات گندله منجر به کاهش احیاپذیری و افزایش میزان استحکام فشاری سرد گندله‌ها شده است. اباذرپور و همکارانش [12]، اثر اندازه ذرات مواد اولیه و روش آسیاکاری را بررسی کرده‌اند و بر اساس یافته‌های آن‌ها اندازه ذرات کوچک‌تر با سطح ویژه بالا منجر به استحکام فشاری خام بالاتر و عدد افتادن بزرگ‌تری شده است.

سختی و آسیاپذیری اصلی‌ترین عوامل تعیین کننده در خردایش کانی‌های آهن ذکر شده‌اند، که به طور عمده توسط اندیس کار بوند (BWI) تعیین می‌شوند [13]. تحقیقات زیادی روی شرایط بهینه آسیاهای گلوله‌ای برای رسیدن به توزیع اندازه دانه مناسب در کمترین زمان و صرف کمترین انرژی آسیا کاری برای رهاسازی بیشینه هماتیت صورت گرفته است و عوامل متعددی همچون نسبت گلوله به کنستانتره، میزان شارژ، سرعت گردش آسیا و میزان رطوبت در تحقیقات مختلف برای ترکیب کانی‌های متعدد بررسی و بهینه شده‌اند [14]. مک ناب و همکارانش آنالیزی اقتصادی از روش‌های مختلف خردایش کانی‌های آهن مگنتیتی ارائه کرده‌اند که با توجه به کاهش حجم معادن هماتیتی در آینده اهمیت بالایی خواهد داشت. بر اساس ارزیابی‌های آن‌ها، با در نظر گرفتن افزایش قیمت‌های انرژی و همچنین اعمال مالیات بر کربن بیشتر در آینده، ترکیب کار آسیای HPGR و سایشی که در فشار محیط کار می‌کنند همراه با جداسازی ناخالصی‌ها در چند مرحله می‌تواند هزینه‌ها را تا ۲۵٪ نسبت به روش خردایش با آسیاهای گلوله‌ای تر کاهش دهند [15]. همچنین متیس و همکارانش آسیای غلتکی عمودی (VRM) را به عنوان یک روش پیشنهادی برای کاهش میزان مصرف انرژی و بهره‌وری بالاتر در خردایش کانی‌های مگنتیتی ارائه کرده‌اند [16]. اباذرپور و همکارانش نیز روش خردایش بال میل را با روش خردایش HPGR در فرایند تولید گندله مقایسه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که کیفیت گندله با افزایش سطح ویژه بهبود می‌یابد. در تحقیق صورت گرفته توسط این گروه محققان فرایند خردایش توسط آسیای غلتکی منجر به سطح ویژه بالاتر و متعاقب آن استحکام خام بالاتر شده است. همچنین شکل غیر کروی ذرات تولید شده در آسیای غلتکی منجر به فشردگی بالاتر گندله‌ها شده است [12].

با توجه به مطالب ارائه شده روش خردایش تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی شکل، توزیع اندازه ذرات و هزینه‌های تولید دارد و در کنار ترکیب کنستانتره جزو عوامل تعیین کننده و مهم در کیفیت گندله نهایی است. از این رو هدف مد نظر در این پژوهش، مقایسه مکانیزم خردایش خوراک ورودی و تأثیر آن بر استحکام گندله محصول است. با بررسی کیفیت گندله خام

تولید شده در دو روش خردایش بال میل و HPGR و بررسی تغییرات ریزساختاری ناشی از این دو نوع خردایش بر گندله پخت شده، تأثیر هر یک از این عوامل روی استحکام نهایی و خواص گندله پخت شده ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

شرکت معدنی صنعتی گل‌گهر سیرجان دارای شش آنومالی (رگه معدنی) با درصد گانگ‌های متفاوت است. خوراک ورودی به کارخانه شماره ۱ از آنومالی شماره ۱ و خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲ از آنومالی شماره ۳ تأمین می‌شود. برای بررسی تأثیر فرایند نوع خردایش روی خواص گندله‌های تولید شده در دو کارخانه شماره ۱ و ۲ که به ترتیب از سیستم خردایش آسیای گلوله‌ای و آسیای غلتکی فشار بالا استفاده می‌کنند، در مقاطع مختلف خط تولید آزمون‌های اندازه‌گیری خواص فیزیکی، شیمیایی، جذب سطحی و ریزساختاری مواد صورت گرفت. در ابتدا آنالیز شیمیایی، اندازه‌گیری سطح ویژه و درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون روی خوراک ورودی کارخانه‌های شماره ۱ و ۲ کارخانه‌های گندله‌سازی مجتمع معدنی گل گهر انجام شد، که خلاصه نتایج آن بر اساس نتایج سه ماه اردیبهشت، خرداد و تیر در سال ۱۳۹۸ در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. در این جدول آنالیز میزان آهن و FeO با روش شیمی تر (تیتراسیون) انجام شده است. آنالیز گوگرد با دستگاه Leco CS744 و سطح ویژه به روش بلین و درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون به کمک غربال تر انجام گرفته است.

جدول ۱ آنالیز خوراک ورودی به کارخانه شماره ۱

تاریخ	آنالیز شیمیایی گندله ۱				آنالیز فیزیکی گندله ۱	
	درصد Feکل	درصد FeO	درصد S	درصد MgO	سطح ویژه $(\frac{cm^2}{g})$	درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون
۹۸/۰۲	۶۶/۶	۲۵/۵	۱/۰۲	۲/۳	۲۲۱۷	۸۴/۵
۹۸/۰۳	۶۶/۶	۲۵/۵	۱/۰۲	۲/۳	۲۱۶۹	۸۴
۹۸/۰۴	۶۶/۷	۲۵/۹	۰/۹۷	۲/۱	۲۱۵۰	۸۲/۱
میانگین	۶۶/۶	۲۵/۶	۱/۰۰	۲/۲	۲۱۷۹	۸۳/۵

جدول ۲ آنالیز خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲

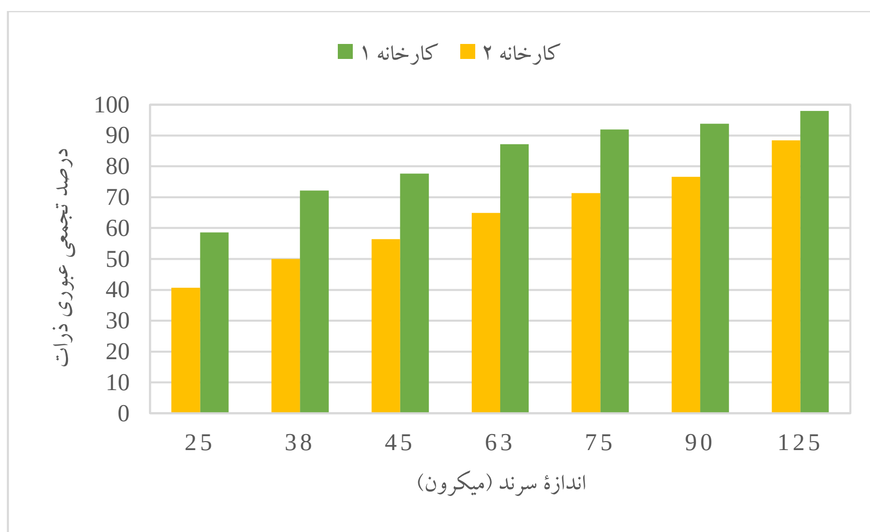
تاریخ	آنالیز شیمیایی گندله ۲				آنالیز فیزیکی گندله ۲	
	درصد Fe کل	درصد FeO	درصد S	درصد MgO	سطح ویژه آسیای فشار قوی $(\frac{cm^2}{g})$	درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون
۹۸/۰۲	۶۷/۷	۲۲/۷	۰/۲۹	۱/۷۰	۱۳۷۰	۴۶/۷
۹۸/۰۳	۶۷/۷	۲۲/۶	۰/۳۰	۱/۷۶	۱۳۶۲	۴۶/۹
۹۸/۰۴	۶۷/۵	۲۲/۳	۰/۲۸	۱/۵۷	۱۳۳۶	۴۷/۱
میانگین	۶۷/۷	۲۲/۵	۰/۲۹	۱/۶۸	۱۳۳۵	۴۶/۹

بررسی‌های ریزساختاری و مورفولوژیکی از ذرات مواد اولیه و ساختار گندله‌های تولید شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی Tescan Vega TS5130 انجام شد و از نرم‌افزار پردازش تصویر MIP برای آنالیز گندله‌ها بهره گرفته شد. سطح ویژه خوراک ورودی به میکسرها به دو روش بلین و BET انجام شد. همچنین میزان رطوبت به کمک رطوبت‌سنج لیزری اندازه‌گیری شد، در این روش میزان کاهش وزن نمونه در اثر تابش پرتو لیزر ثبت می‌شود و به کمک آن درصد رطوبت نمونه سنجیده می‌شود. به منظور بررسی مقاومت به ضربه گندله تر، آزمون عدد افتادن گندله تر انجام گرفت. در این آزمون تعداد دفعاتی که گندله در حالت مرطوب بدون شکستن از ارتفاع معینی رها می‌شود محاسبه می‌شود. روی گندله‌های پخته شده تست اندازه‌گیری میزان کرویت و تست سایش به کمک دستگاه تامبلر نیز صورت گرفت. علاوه بر این تست اندازه‌گیری استحکام فشاری در سه حالت گندله مرطوب (WCS)، خشک شده (DCS) و پخت شده (CCS) انجام شد. آنالیز استحکام فشاری توسط دستگاه‌های اتوماتیکا (برزیلی) و دستگاه سنتام (ساخت داخل) انجام شده است. آنالیز استحکام فشاری گندله پخت شده در سه مرحله صورت گرفت. در مرحله اول با انتخاب ۳۰ عدد گندله با بهترین اشکال از نظر کروی بودن و بدون ترک و شکستگی، به عنوان نمونه انتخابی انجام شد. در دو مرحله دیگر، آزمون با انتخاب نمونه به صورت اتفاقی، یعنی بدون جدا کردن گندله‌های شکسته و غیر کروی صورت گرفت.

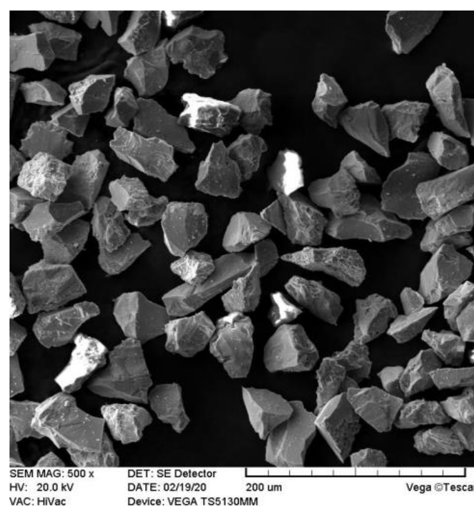
نتایج و بحث

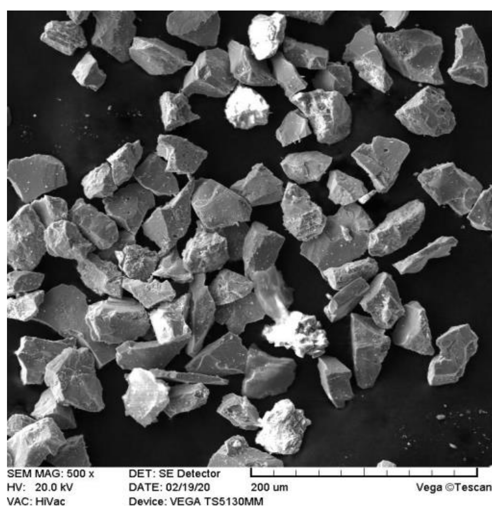
نتایج آنالیز شیمیایی خوراک ورودی به کارخانه‌های شماره ۱ و ۲ که به ترتیب در جداول شماره ۱ و ۲ آمده است، نشانگر وجود درصد بالاتر از FeO، گوگرد و اکسید منیزیم در خوراک ورودی کارخانه گندله‌سازی شماره یک است. مقدار بالاتر اکسید آهن به شکل ووستیت (FeO) می‌تواند به معنی سخت‌تر احیا شدن گندله باشد، چون آهن دو ظرفیتی از پایداری بالاتری نسبت به مگنتیت و هماتیت برخوردار است [17]. از طرفی بالاتر بودن میزان گوگرد اگر چه به معنی ناخالصی بیشتر در مواد اولیه است اما حین خروج از ساختار منجر به ایجاد حفرات بیشتر در گندله می‌شود و به فرایند احیا کمک می‌کند. علاوه بر این میزان اختلاف در میزان گوگرد در این مورد بسیار کم و در حد ۰/۷ درصد است. در رابطه با اکسید منیزیم نیز میزان اختلاف دو ترکیب دو کارخانه ناچیز و در حد ۰/۵ درصد است و اکسید منیزیم اگر چه به عنوان یک ناخالصی دیده می‌شود اما در مقادیر کم می‌تواند علاوه بر بالا بردن بازیسیته به بهبود احیاپذیری گندله کمک کند و به مقدار قابل ملاحظه از تمایل به دفرمه شدن گندله‌ها حین فرایند بکاهد [18]. بر خلاف موارد ذکر شده در تحقیق آباذرپور و همکارانش [12]، بر اساس آنالیز جدول‌های (۱) و (۲) در شرکت گل گهر، آسیای بال میل در مقایسه با آسیای غلتکی فشار بالا منجر به اندازه دانه‌ریزتر و متعاقب آن درصد اندازه دانه کمتر از ۴۵ میکرون بسیار بالاتری شده است، که می‌تواند به افزایش قابلیت جذب آب و نرخ احیاپذیری بالاتر گندله منجر شود. این موارد را می‌توان به شکل توزیع بالاتری از ذرات با دانه‌های ریز در خوراک ورودی کارخانه شماره یک که در شکل (۱) آمده است نیز دید.

آنالیز SEM ذرات تولید شده با دو آسیای بال میل و غلتکی در شکل (۲) نمایش داده شده است. سایز ذرات در بازه ۲۵ تا ۳۸ میکرون (روی الک ۲۵ میکرون و زیر الک ۳۸ میکرون) انتخاب شدند. به دلیل استفاده از چسب برای نگهداری ذرات روی سطح نگهدانده نمونه در میکروسکوپ SEM، استفاده از ذرات کوچک‌تر منجر به آگلومراسیون و عدم امکان تصویربرداری دقیق می‌شد. لذا این بازه از ذرات انتخاب شدند تا هم از آگلومراسیون آن‌ها جلوگیری شود و هم امکان مقایسه مورفوژی در دو کارخانه فراهم شود. از لحاظ مورفولوژی ذرات حاصل از دو فرایند آسیاکاری تفاوت فاحشی ندارند. همچنین مورفولوژی ذرات به شکل شکسته و با لبه‌های تیز می‌باشد و ذرات حالت کروی‌شکل ندارند.



شکل ۱ توزیع اندازه ذرات خوراک ورودی به میکسر بر اساس تجمعی عبوری ذرات





شکل ۲ تصویر SEM ذرات با اندازه بین ۲۵ ـ ۳۸ میکرومتر، راست) آسیای فشار بالا، چپ) آسیای گلوله‌ای

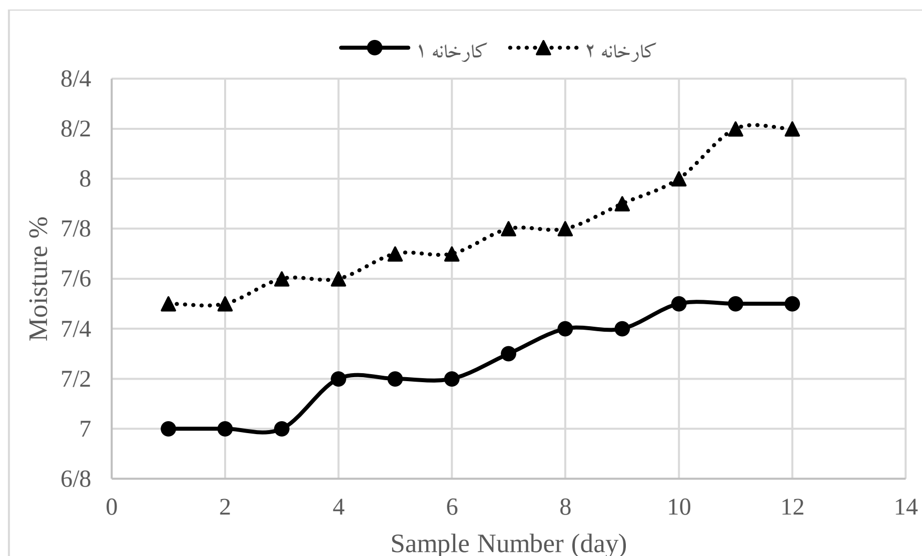
جدول ۳ نتایج آنالیز بلین (میانگین شش روزه) و آنالیز BET از خوراک ورودی به دوکارخانه

آزمون سطح ویژه	واحد	کارخانه شماره ۱ (آسیای گلوله‌ای)	کارخانه شماره ۲ (آسیای فشار بالا)	درصد اختلاف
Blaine	$\frac{cm^2}{g}$	۱۹۸۸	۱۳۵۵	۳۱
BET	$\frac{cm^2}{g}$	۲۰۲۶۴	۱۹۷۳۳	۳

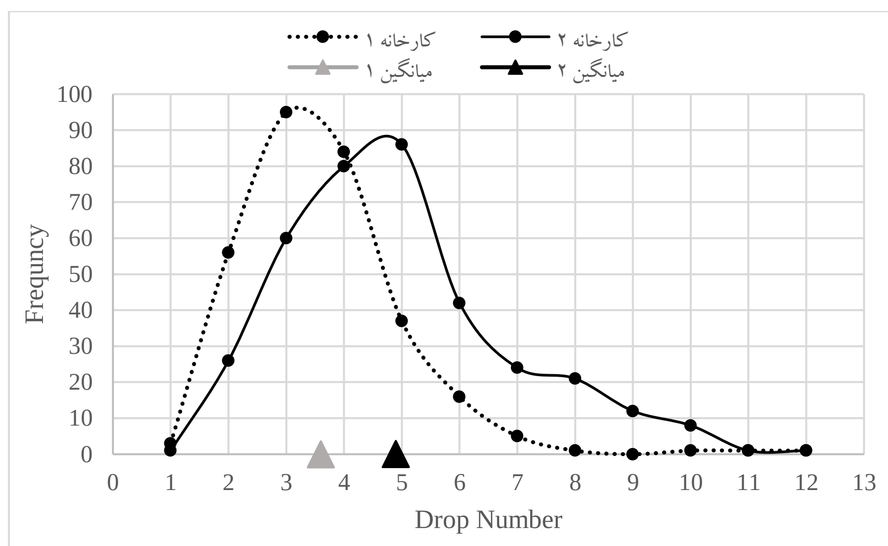
جدول (۳) نتایج آنالیز سطح ویژه ذرات به دو روش بلین و BET از خوراک دو کارخانه را خلاصه کرده است. بر اساس آنالیز بلین ذرات تولید شده در کارخانه شماره ۱ به کمک آسیای گلوله‌ای دارای سطح ویژه بسیار بالاتری هستند و طبق آنالیز BET نیز ذرات تولید شده در آسیای گلوله‌ای دارای سطح ویژه بالاتری هستند، هر چند که در مورد آنالیز BET میزان اختلاف سطح ویژه به میزان جزیی ۳٪ است، اما اگر نتایج را با آنالیز توزیع اندازه ذرات در شکل (۱) مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که توزیع اندازه ذرات در روش خردایش آسیای گلوله‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای به شکل‌گیری ذرات ریزتر

منجر شده است، که بیشتر در تطابق با روش آنالیز بلین است. میزان اختلاف سطح ویژه اندازه‌گیری شده در روش بلین بسیار بالاتر است که این اختلاف در اندازه سطح ویژه اندازه‌گیری شده را می‌توان به ماهیت روش‌های اندازه‌گیری نسبت داد. روش بلین سطح ویژه را بر اساس مقاوت ذرات در برابر عبور هوا اندازه‌گیری می‌کند و عملا در این روش سطح ویژه اندازه‌گیری شده وابسته به سایز ذرات است، در حالی که روش BET بر مبنای میزان جذب و واجذب گازی خنثی مانند نیتروژن است و علاوه بر سایز ذرات در این روش نقش میکروترک‌ها و حفره‌ها نیز در اندازه‌گیری سطح ویژه دیده می‌شود. بنابراین جای تعجبی ندارد که سطح ویژه اندازه‌گیری شده توسط روش BET برای هر دو نمونه در مقایسه با روش بلین بسیار بزرگ‌تر است. همچنین سطح ویژه بلین بالاتر در کارخانه شماره ۱ در تطابق با نتایج توزیع اندازه ذرات در شکل (۱) است، که ذرات تولید شده به روش آسیای گلوله‌ای در کارخانه شماره ۱ را ریزتر نشان می‌دهد. در روش آسیای غلتکی به دلیل ماهیت روش خردایش بر اساس فشار غلتک‌ها احتمال بروز میکروترک‌ها بیشتر است و سهم میکروترک‌ها در افزایش سطح ویژه بالاتر است که در تطابق با نتایج آورده شده در جدول (۳) است. با اینکه بر اساس شکل (۱) ذرات تولید شده در کارخانه ۱ ریزتر هستند، اما از لحاظ سطح ویژه BET (جدول ۳) اختلاف چندانی ندارند.

آنالیز درصد رطوبت از گندله خام در دو کارخانه در شکل (۳) آورده شده است. نمونه‌برداری به شکل تصادفی طی ۱۲ روز انجام شده است و به صورت اتفاقی روند افزایشی ناچیزی در مقادیر رطوبت ثبت شده دیده می‌شود. میانگین رطوبت در کارخانه شماره ۱ برابر با ۷/۳ درصد و در کارخانه شماره ۲ برابر با ۷/۸ درصد نشان داده می‌شود. همچنین نتایج تست عدد افتادن روی گندله‌ها در شکل (۴) مشاهده می‌شود. عدد افتادن گندله خام در گندله‌سازی شماره ۱ برابر با ۱,۴± ۳/۷ و در گندله‌سازی شماره ۲، عدد افتادن بالاتر و به میزان ۱,۹± ۵ است. عدد افتادن بالاتر به معنی تعداد دفعاتی است که گندله خام از ارتفاع معینی رها می‌شود بدون آنکه دچار شکست شود و بالاتر بودن آن در کارخانه ۲ را می‌توان به میزان بالاتر رطوبت و متعاقب آن خاصیت پلاستیسیته بهتر در گندله کارخانه ۲ نسبت داد. رطوبت بالاتر در کارخانه ۲ به معنی حذف آب بیشتر حین خشک شدن و کسر حفرات بیشتر و چگالی کمتر پس از خشک شدن است که این می‌تواند منجر به افت استحکام خام شود. افزودن رطوبت به منظور حفظ پلاستیسیته و فرم‌پذیری کافی صورت می‌گیرد اما رطوبت زیاد همزمان می‌تواند منجر به کاهش استحکام خام نیز شود. در این تحقیق اختلاف میزان رطوبت در دو کارخانه مقدار ناچیز ۰/۵ درصد است که تأثیر قابل توجهی را روی استحکام نخواهد داشت.

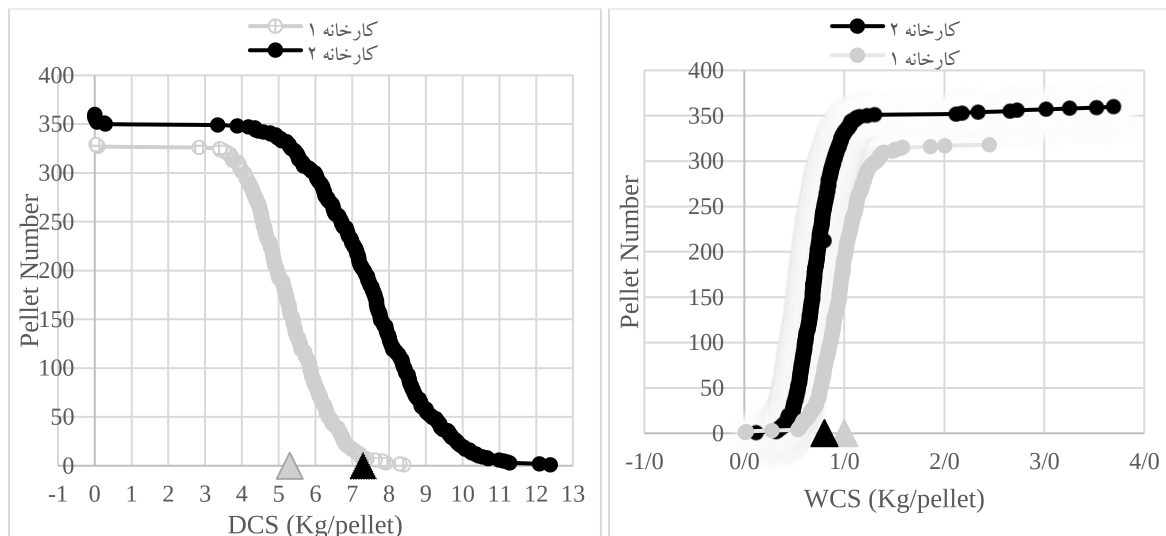


شکل ۳ نمودار رطوبت گندله خام به صورت مقایسه‌ای در دو کارخانه

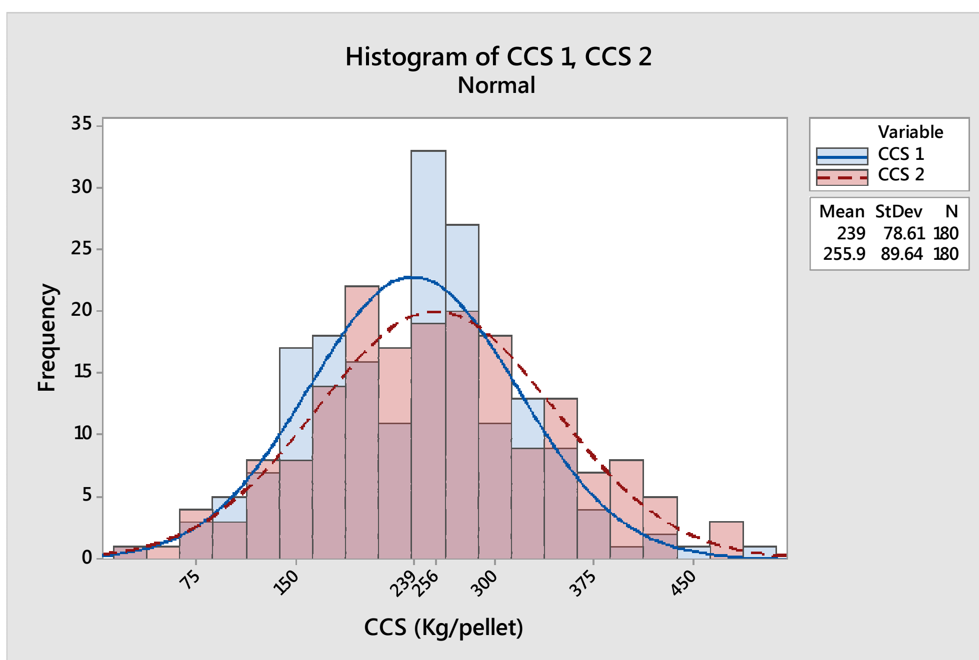


شکل ۴ نمودار مقایسه‌ای عدد افتادن در دو کارخانه

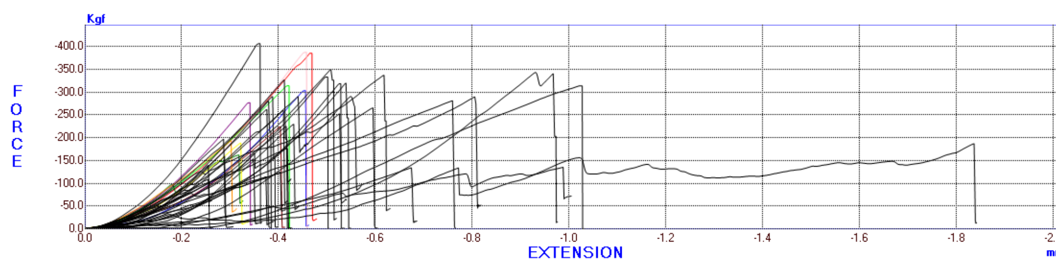
شکل (۵) نتایج آزمون استحکام گندله تر (WSC) و خشک (DSC) را روی نمونه‌های گندله نشان می‌دهد. میانگین استحکام فشاری گندله خام در حالت تر در کارخانه گندله‌سازی شماره ۱ برابر با۰/۴۱ ± ۰/۹۸ کیلوگرم بر گندله و در کارخانه گندله‌سازی شماره ۲ به مقدار ۰/۳۸± ۰/۷۶ کیلوگرم بر گندله می‌باشد و استحکام گندله خام در حالت خشک در کارخانه شماره ۱ برابر با ۱/۰۹± ۵/۳ کیلوگرم بر گندله و در کارخانه شماره ۲ برابر با ۱/۹۶ ± ۷/۳ کیلوگرم بر گندله می‌باشد. همچنین نتایج استحکام پخت (CCS) نمونه‌ها که روی تعداد ۳۰ عدد گندله پخته در هر روز با اندازه ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر طی شش روز نمونه‌برداری انجام شده است، در شکل (۶) با نمودار مقایسه‌ای و توزیع نرمال بر روی تعداد ۱۸۰ عدد گندله پخته از هر کارخانه آورده شده است. علاوه بر این منحنی نیرو ـ جابه‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۴۸ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۱ و منحنی نیرو ـ جابه‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۵۹ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۲ را به ترتیب در شکل‌های شماره (۷) و (۸) مشاهده می‌کنید. آزمون‌های آورده شده در شکل (۷) و (۸) به صورت نمونه آورده شده‌اند و معیاری از میانگین استحکام در نمونه‌های تولید شده در کارخانه ۱ و ۲ نیستند. بر اساس نتایج اندازه‌گیری استحکام، گندله تولید شده در کارخانه شماره ۱ استحکام بالاتر در حالت گندله مرطوب (WCS) دارند، در حالی که استحکام خشک (DCS) و استحکام پخت (CCS) گندله در کارخانه شماره ۲ بالاتر است. بالاتر بودن استحکام تر را می‌توان به ریزدانه‌تر بودن و سطح ویژه بالاتر ذرات خوراک ورودی کارخانه ۱ نسبت داد، چون بر اساس آنالیز SEM ذرات مورفولوژی مشابهی دارند و شکل ذرات تأثیر زیادی روی استحکام یا تراکم‌پذیری آن‌ها نداشته است. بالاتر بودن استحکام خشک در کارخانه ۲ را هم می‌توان به توزیع بهتر موارد رسی چسبنده با رطوبت بالاتر نسبت داد. همچنین بالاتر بودن میانگین استحکام پخت نمونه‌های تولید شده در کارخانه ۲ را می‌توان به کسر کمتر گوگرد در ترکیب شیمیایی خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲ نسبت داد. کسر کمتر گوگرد به معنی خروج کمتر گازهای فرار سولفیدی و میکروترک‌های کمتر در گندله نهایی است که منجر به استحکام بالاتر می‌شود. به دلیل پایین‌تر بودن سطح ویژه مواد تولید شده توسط آسیای غلتکی در این کارخانه، بر خلاف تحقیق صورت گرفته توسط اباذرپور و همکارانش، نمی‌توان بالا بودن استحکام در روش خردایش HPGR را به سطح ویژه بالاتر ذرات نسبت داد. در فرایند پخت مرحله‌ای بحرانی وجود دارد که در دماهای بالاتر از ۳۰۰ °C درجه تا شروع زینترینگ در حدود ۹۰۰ °C رخ می‌دهد. در این محدوده دمایی ذرات استحکام اولیه ناشی از خاصیت پلاستیک رس‌ها را از دست داده‌اند و هنوز به نقطه‌ای نرسیده‌اند که ذوب مواد فلاکس باعث به هم پیوستن ذرات و به دست آمدن استحکام پخت شود [۱۹]، علاوه بر این در این محدوده دمایی خروج گازهای فرار عمدتا سولفیدی منجر به ایجاد حفرات و تغییرات ترکیب اکسید آهن از هماتیت به مگنتیت نیز منجر به تغییرات ابعادی و احیانا ایجاد ترک‌های ریز در گندله می‌شود.



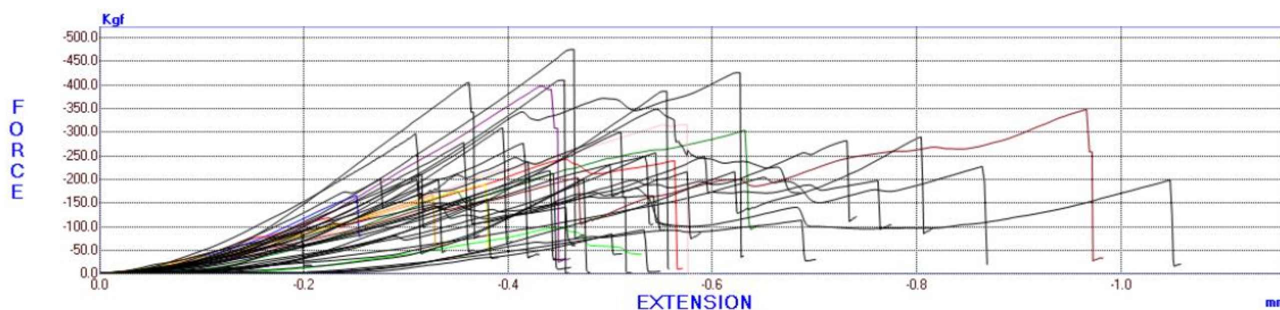
شکل ۵ نتایج آزمون استحکام تر (WSC) و خشک (DSC) روی نمونه های گندله



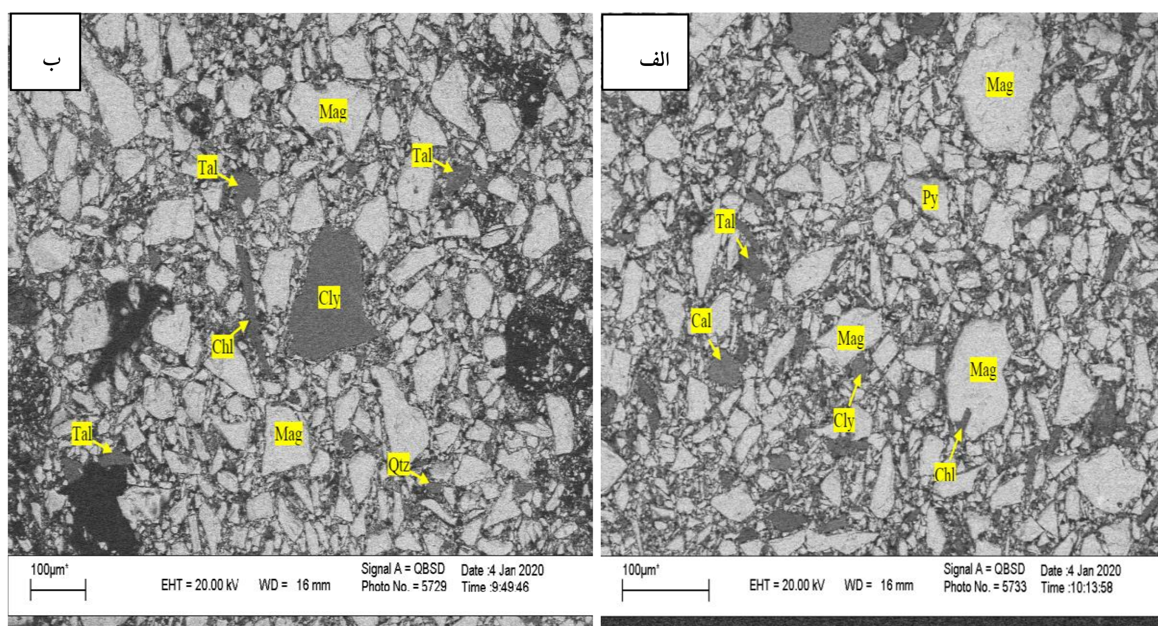
شکل ۶ نمودار مقایسه‌ای نتایج تست CCS، خط آبی کارخانه شماره ۱ و قرمز کارخانه شماره ۲



شکل ۷: منحنی نیرو ـ جابه‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۴۸ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۱



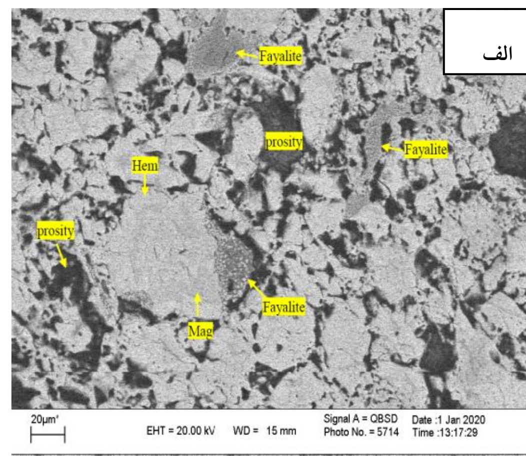
شکل ۸ منحنی نیرو ـ جابه‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۵۹ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۲

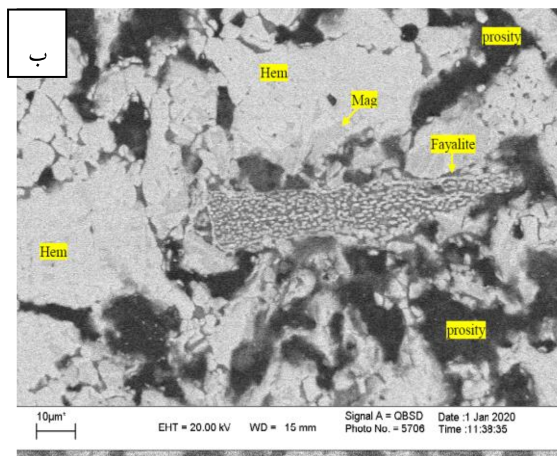


شکل ۹ تصویر SEM از سطح مقطع گندله خام: الف) کارخانه شماره ۱ و ب) کارخانه شماره ۲

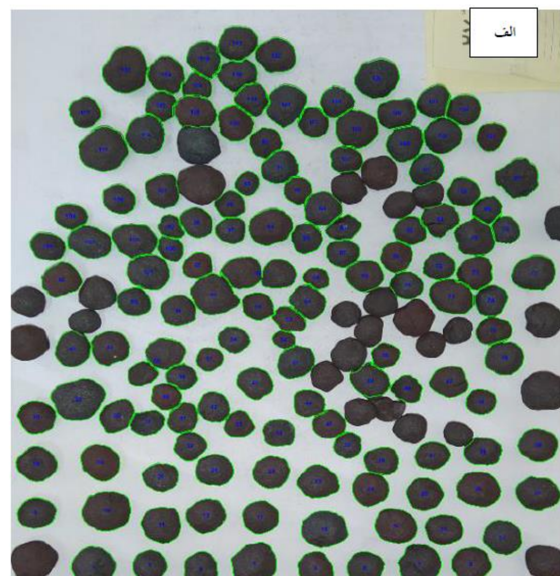
شکل شماره (۹ ـ الف) و (۹ ـ ب) نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی SEM از نمونه‌های گندله خام را نشان می‌دهد. و توزیع فازهای مختلف مگنتیت (Mag)، اکسید کلسیم (Cal) و رس بنتونیت (Cly)، پیریت (Py) و کوارتز (Qtz) در آن دیده می‌شود. بر اساس این تصاویر توزیع ذرات کوچک‌تر مگنتیت در کارخانه شماره ۱ (شکل ۹ ـ الف) که خردایش به روش آسیای گلوله‌ای بوده مشهود است، که در تطابق با نتایج آماری غربال ذرات در شکل (۱) است.

در شکل (۱۰) توزیع فازهای مختلف به کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری در کارخانه شماره (۱) و (۲) آورده شده است. بر اساس این تصاویر ریزساختار نهایی گندله‌های پس از پخت دارای مقادیری فایالیت، هماتیت (Hem)، تخلل و مگنتیت (Mag) است. فایالیت تشکیل شده ناشی از حل شدن مقادیر از اکسید آهن در سیلیس موجود است و هماتیت تشکیل شده عمدتا در اثر احیای ناقص مگنتیت ایجاد شده است. در حالت کلی ریزساختار گندله کارخانه شماره ۲ حاوی ذرات و تخلخل‌های بزرگ‌تری است که پایین‌تر بودن مقاومت به سایش (جدول ۴) نمونه‌های تولید شده در کارخانه شماره ۲ را توجیه می‌کند.





شکل ۱۰ تصویر SEM از سطح مقطع گندله پخته شده: الف) کارخانه شماره ۱ و ب) کارخانه شماره ۲





شکل ۱۱ تصاویر مربوط به بررسی درصد کرویت گندله‌های کارخانه شماره ۱ (الف) و کارخانه شماره ۲ (ب)

میزان سایش گندله‌ها در اثر چرخش دستگاه تامبلر در جدول (۴) آورده شده است. AI شاخص سایش یا استحکام سایش گندله پخته و TI درصد گندله‌هایی که در اثر چرخش دستگاه تامبلر سالم مانده‌اند را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۴) بررسی درصد کرویت گندله پخته با پردازش تصویر توسط نرم‌افزار MIP بر روی ۱۳۰ عدد گندله پخته از محصول هر کارخانه و از تمامی اندازه‌ها آورده شده است که این نتایج بر اساس تحلیل فرم گندله‌های آورده شده در شکل (۱۱) انجام شده است. عدد ۱ بیانگر کرویت کامل می‌باشد و هر چه میانگین کرویت گندله‌ها به عدد ۱ نزدیک‌تر شود، از کرویت بالاتری برخوردار است. بر اساس نتایج تست سایش و کرویت که در جدول (۴) دیده می‌شود، گندله‌های تولید شده در کارخانه شماره ۱ دارای مقاومت به سایش بالاتر بوده و درصد گندله‌های سالم مانده پس از سایش در این کارخانه بالاتر است که این نتایج در تطابق با مشاهدات میکروسکوپی مبنی بر ذرات ریزتر و توزیع تخلل یکنواخت‌تر در گندله‌های کارخانه شماره ۱ می‌باشد. علاوه بر این، محصولات کارخانه شماره ۱ کرویت بهتری نیز دارند که نشان دهنده کمتر دفرمه شدن گندله‌ها در اثر توزیع یکنواخت‌تر فازهای مذاب شیشه‌ای تشکیل شده می‌باشد. مقاومت به سایش بالاتر گندله‌ها علاوه بر تأثیر مثبت بر بهبود

کیفیت آهن اسفنجی نهایی تولید شده، منجر به کاهش حجم غبار تولید شده حین فرایند و کاهش آلودگی‌های ناشی از غبار می‌شود [20,21].

جدول ۴ میزان سایش گندله‌ها در اثر چرخش دستگاه تامبلر و درصد کرویت آن‌ها

نوع تست	کارخانه شماره ۱	کارخانه شماره ۲
AI	۲/۹	۳/۹
TI	۹۶/۳	۹۵/۴
درصد کرویت	۰/۸۲۴	۰/۷۵۸

نتیجه‌گیری

در بخش‌های مختلف کارخانه‌های گندله‌سازی شماره ۱ و ۲ مجتمع گل گهر، آنالیزهای شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی و بررسی ریزساختاری روی محصولات انجام شد. بر اساس آنالیزهای انجام شده تفاوت ترکیب شیمیایی مواد اولیه ورودی و مورفولوژی ذرات حاصل از خردایش در دو کارخانه فاحش نیست و ذرات مورفولوژی غیر کروی با اشکال نامنظم دارند. ذرات تولید شده به روش آسیای گلوله‌ای ریزتر بوده و دارای سطح ویژه بلین بالاتری (۱۹۸۸ g/cm^3) هستند. اندازه‌گیری سطح ویژه به روش BET نشان داد ذرات تولید شده با هر دو روش خردایش بال میل و آسیای غلتکی مقادیری نزدیک به هم دارند. نزدیک بودن سطح ویژه BET ذرات تولید شده در دو کارخانه علی‌رغم ریزتر بودن ذرات تولید شده با آسیای غلتکی را می‌توان به وجود میکروترک‌ها و حفره‌های بیشتر در ذرات تولید شده به روش آسیای غلتکی نسبت داد. علاوه بر این توزیع یکنواخت‌تری نیز از ذرات ریزدانه در محصولات این نوع خردایش دیده می‌شود، که در نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی در گندله‌ها قبل از فرایند پخت نیز مشهود است. می‌توان استدلال کرد که این توزیع بهتر منجر به توزیع بهتر فازهای مذاب در فرایند پخت شده و در نتیجه فاز مذاب شیشه‌ای تشکیل شده یکنواخت بوده و میزان دفرمه شدن ذرات کاهش پیدا کرده است به گونه‌ای که مقاومت به سایش و میزان کرویت گندله‌های تولید شده با روش آسیای گلوله‌ای بالاتر و به میزان میانگین ۰/۸۲۴ است. همچنین بالاتر بودن میانگین استحکام پخت نمونه‌های تولید شده در کارخانه ۲ را می‌توان به کسر کمتر گوگرد در ترکیب شیمیایی خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲ نسبت داد. کسر کمتر گوگرد به معنی خروج کمتر گازهای فرار سولفیدی و میکروترک‌های کمتر در گندله نهایی است که منجر به استحکام بالاتر می‌شود.

واژه نامه

استحکام فشاری نمونه مرطوب	Wet crushing strength (WCS)
استحکام فشاری نمونه خشک	Dried crushing strength (DCS)
استحکام فشاری نمونه پخت شده	Cold crushing strength (CCS)
آسیای غلتکی عمودی	Vertical roll mill (VRM)
آسیای غلتکی فشار بالا	High pressure grinding rolls (HPGR)
آسیای گلوله‌ای	Ball mill
آنومالی (رگه معدنی)	Anomaly
اندیس کار بوند	Bond work index (BWI)
بلین	Blaine
دامپلر	Dompler
کنستانتره	Concentrate
گانگ (ناخالصی‌های سنگ معدن)	Gangue
گندله	Pellet
مگنتیت	Magnetite
میکروسکوپ الکترونی روبشی	Scanning electron microscope (SEM)
هماتیت	Hematite

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] N. Tohidi, R. Vaghar, Load of iron and steel production furnaces. Tehran University Publication, 2021. (In Persian)

[2] K. Motamedi, S. Zandvakili, A. Hajizadeh, “A review on the effect of concentrate characteristics and the effective crushing method on pellet quality,” Iran National Conference on Materials Engineering, Metallurgy and Mining, 2018, pp. 1-17. (In Persian) https://civilica.com/doc/769023

[3] K. Meyer, Pelletizing of Iron Ores. Germany, Springer-Verlag, 1980.

[4] F. Przemysław, J. Mróz, “Ability for self-pelletization of iron ores and magnetite concentrates,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 18, no. 6, pp. 1-7, 2011. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60069-1

[5] P. Karimi, A. Noori Kuhbanani, S. M. Mousavi, “Investigating the effectiveness of HPGR and pelletizer combined circuits in the preparation of iron pellet factory feed, case study: factories of line 4 and lines 5, 6 and 7 of iron concentrate production of Gol Gohar Mining and Industrial Company,” First international conference on materials engineering, metallurgy and mining, 2021, pp. 1-11. (In Persian). https://civilica.com/doc/1250616

[6] S. Niksirat, M. H. Shahid Kalombari, M. R. Abutalebi, M. Adeli, “Investigation of the properties of raw pellets produced from iron ore concentrate of Chagharat mine by disk pelletizing method,” Seventh joint conference of Iran Metallurgical Engineering Association and Scientific Association Casting Iran, 2013, pp. 1-5. (In Persian) https://civilica.com/doc/224307

[7] S.K. Kawatra, V. Claremboux, “Iron ore pelletization: Part II. Inorganic binders,” *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 43, no. 7, pp. 813-832, 2022. https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1947269

[8] K. Motamedi, S. Zandvakili, A. Hajizadeh, “The effect of softening mechanism of iron concentrate of Gol Gohar mine on quality indicators of raw pellets produced,” *Journal of Mineral Resources Engineering*, vol. 1, no. 5, pp. 143-160, 2020 (In Persain). https://doi.org/10.22067/jmme.2025.90387.1162

[9] A. Abazarpoor, M. Halali, “Investigation on the particle size and shape of iron ore pellet feed using ball mill and HPGR grinding methods,” *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53, no. 2, pp. 908-919, 2017. http://dx.doi.org/10.5277/ppmp170219

[10] J.A. Pal, S. Ghoari, A. Ammasi, S.K. Hota, V.M. Koranne, T. Venugopalan, “Improving reducibility of iron ore pellets by optimization of physical parameters,” *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, vol. 53, no. 1, pp. 37-46, 2017. https://doi.org/10.2298/JMMB151206014P

[11] M. Iljana, T. Paananen, O. Mattila, M. Kondrakov, T. Fabritius, “Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties,” *Metals*, vol. 12, no. 2, pp. 302, 2022. https://doi.org/10.3390/met12020302

[12] A. Abazarpoor, M. Halali, R. Hejazi, M. Saghaeian, V.S. Zadeh, “Investigation of iron ore particle size and shape on green pellet quality,” *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, vol. 59, no. 2, pp. 242-250, 2020. https://doi.org/10.1080/00084433.2020.1730116

[13] H. Hanumanthappa, H. Vardhan, G.R. Mandela, M. Kaza, R. Sah, B.K. Shanmugam, S. Pandiri, “Investigation on iron ore grinding based on particle size distribution and liberation,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, pp. 1853-1866, 2020. https://doi.org/10.1007/s12666-020-01999-5

[14] W. Guo, Y. Han, Y. Li, Z. Tang, “Impact of ball filling rate and stirrer tip speed on milling iron ore by wet stirred mill: Analysis and prediction of the particle size distribution,” *Powder Technology*, vol. 22, no. 378, pp. 12-18, 2021. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.052

[15] B. McNab , A. Jankovic , D. David, P. Payne, "Processing of Magnetite Iron Ores – Comparing Grinding Options," *In Proceedings of the AusIMM Iron Ore Conference*, 2009, pp. 1-12.

[16] M. Reichert, C. Gerold, A. Fredriksson, G. Adolfsson, H. Lieberwirth, "Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill," *Minerals Engineering*, vol. 15, no. 73, pp. 109-15, 2015. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.021

[17] Z. Zhang, B. Kumar, "The Characteristics and Reduction of Wustite," Iron Ores and Iron Oxides - New Perspectives, chapter 4, IntechOpen publication, 2023. https://doi.org/10.5772/intechopen.1001051

[18] S. Dwarapudi, T. K. Ghosh, A. Shankar, V. Tathavadkar, D. Bhattacharjee, R. Venugopal, "Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 99, no. 1–4, pp. 43-53, 2011. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.03.004

[19] C. Scharm, F. Küster, M. Laabs, et. al, "Direct reduction of iron ore pellets by H2 and CO: In-situ investigation of the structural transformation and reduction progression caused by atmosphere and temperature," *Minerals Engineering*, vol. 180, p. 107459, 2022. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107459

[20] A.H.M. Najafabadi, A. Masoumi, S.M.V. Allaei, "Analysis of abrasive damage of iron ore pellets," *Powder technology*, vol. 331, pp. 20-27, 2018. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.030

[21] J.A. Halt, M.C. Nitz, S.K. Kawatra, M. Dubé, "Iron ore pellet dustiness part I: factors affecting dust generation," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 36, no. 4, pp. 258-266, 2015. https://doi.org/10.1080/08827508.2014.928876